



·激光合束技术·

基于光纤合束器件的高功率全光纤相干合成技术研究进展与展望*

闫玥芳^{1,2}, 陶汝茂¹, 刘 琦¹, 李雨薇¹, 张昊宇¹, 楚秋慧¹, 李 敏¹,
舒 强¹, 冯 曦¹, 黄文会², 景 峰¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 清华大学 工程物理系
粒子技术与辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 介绍了目前研究中相干合成多采用空间结构的研究现状, 分析了空间结构的相干合成方案需要复杂的光路调节且长时间工作稳定性欠缺, 肯定了基于光纤合束器件的全光纤激光相干合成在相干合成光源中的稳定性与实用性, 梳理了近年来基于光纤合束器件的全光纤激光相干合成方案, 分别介绍了基于光纤耦合器、光子灯笼、相干信号合束器以及基于自成像效应实现全光纤合束的技术方案及研究现状, 分析了不同光纤器件目前的主要限制因素和发展瓶颈, 并展望了未来的发展方向。

关键词: 相干合成; 高功率光纤激光; 全光纤; 光束质量

中图分类号: O436

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220316

Research progress and prospect of high power all-fiber coherent beam combination based on fiber combining devices

Yan Yuefang^{1,2}, Tao Rumao¹, Liu Yu¹, Li Yuwei¹, Zhang Haoyu¹, Chu Qiuhui¹, Li Min¹,
Shu Qiang¹, Feng Xi¹, Huang Wenhui², Jing Feng¹

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging of Ministry of Education,

Tsinghua University, Beijing 100084, China))

Abstract: The output power of high-power single fiber laser is limited by various physical effects, and it is difficult to achieve a breakthrough in the short term. Coherent beam combination (CBC) of fiber lasers is an effective technical solution to break the power limit of single fiber laser and achieve higher output power. This paper introduces the status quo of CBC research, which mostly uses free-space structure. It is analyzed that the CBC scheme of spatial structure requires complex optical adjustment, and suffers the problem of long-term drifting. The all-fiber coherent beam combination based on all-fiber combining device can enhance the stability and practicability of the combining laser source, and the recent development of CBC in all-fiber format is reviewed in detail. The combining schemes and research status based on fiber coupler, photon lantern, coherent signal combining device and all-fiber device of self-imaging effect are introduced respectively. The main limiting factors and development bottlenecks of different fiber devices are discussed, and the future development prospects are analyzed.

Key words: coherent beam combination, high power fiber laser, all-fiber, beam quality

光纤激光器以转化效率高、光束质量好、热管理方便、质量轻、体积小等独特优点, 在前沿科学、材料加工、国防工业等领域得到了广泛应用^[1-8]。随着双包层光纤制备工艺和高亮度泵浦源技术的快速发展, 光纤激光输出功率迅速提升, 单纤单模输出功率已迈入 10^4 W 门槛^[9-15]。由于光纤细长的结构特点, 高功率光纤激光光纤芯功率密度极高、容易激发非线性效应, 而且光纤激光热效应随着功率提升也不断累积加重, 导致模式不稳定效应。因此, 受

* 收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2022-11-29

联系方式: 闫玥芳, joyyyf@163.com。

通信作者: 陶汝茂, supertaozhi@163.com。

制于非线性效应、模式不稳定效应、泵浦亮度与热透镜效应等因素^[16-22],单纤光纤激光输出功率难以无限制提升,单纤单模输出功率止步于 20 kW^[23-24]。

为了突破单纤输出功率限制,科学家们提出了利用光束合成技术将多路中等功率光纤激光合成为一束更高功率激光的方案,其中相干合成技术可以在提升功率的同时保持激光光束质量、大幅提升光源亮度,受到了科研人员的广泛关注^[25-32]。自 2011 年,国防科技大学研究人员突破 kW 相干合成光纤激光以来^[33],相干合成光纤激光技术飞速发展;2020 年耶拿大学的 Michael 等研究人员实现了脉冲激光相干合成输出功率 10.4 kW^[34],2021 年国防科技大学实现了 19 通道 20 kW 相干合成^[31]。然而,前述标志性成果均采用自由空间结构实现,自由空间结构的合成光路导致光路调节繁琐、杂散光管理困难、维护成本大增,而且在相位/偏振控制系统之外还需要采特殊设计的光路控制装置对光路进行补偿校正^[35-38],增加了系统的复杂度、降低了可靠性,成为相干合成光纤光源从实验室迈入工程应用的绊脚石之一。

近年来,随着光纤器件制备工艺以及高功率传能技术的不断发展,全光纤合束器件的耐受功率不断提升^[5,39],2013 年美国 IPG 公司推出 100 kW 全光纤信号合束的光纤激光系统^[40-41]。展现了全光纤合束器件巨大的发展潜力,但由于使用的是非相干合束方案,输出光束质量差,100 kW 激光系统的输出光束质量为 25 mm·mrad^[42]。基于全光纤合束器件的相干合成方案具有结构紧凑、无需光路调节、性能稳定等优点,全部激光功率实现单端口输出,有望克服自由空间结构给相干合成光源带来的挑战,而且还可以克服基于全光纤合束器件的非相干合束方案亮度低的不足,实现近衍射极限的高光束质量信号合成光束,在光纤激光相干合成中具有巨大应用前景和重大实际意义,一直得到全世界研究人员的关注^[43-49]。此外,全光纤相干合成的合束方案还包括光学反馈环形腔结构的合束方案^[50-53]、全光纤组织合成结构的合束方案^[54-57]等,但由于这些结构的全光纤合束方案多为被动锁相,存在随着路数增加、合成效率下降的问题^[58-61],在多路数高功率的相干合成中不具备优势与潜力,因此在本文中不作详细介绍。本文梳理了近年来基于全光纤合束器件的激光相干合成的技术方案和研究进展,分析了目前全光纤相干合成方案的限制因素和研究瓶颈,展望了全光纤相干合成光源的发展趋势。

1 基于光纤合束器件的高功率全光纤相干合成技术研究进展

全光纤相干合成技术是利用全光纤合束器件实现多个光纤激光器的相干光束合成,典型的全光纤相干合成系统结构如图 1 所示。种子激光由分束器分为多路,每一路激光经过光学延迟线、相位调制器、放大器后与全光纤合束器尾纤熔接,经过全光纤合束器实现各路激光的相干合成。为了对合成效果进行评价,同时为参量控制提供反馈信号,通常利用光束分光镜提取小部分激光进行探测。对于非保偏激光系统,还需要增加主动偏振控制系统对偏振态进行控制^[26,62-63]。

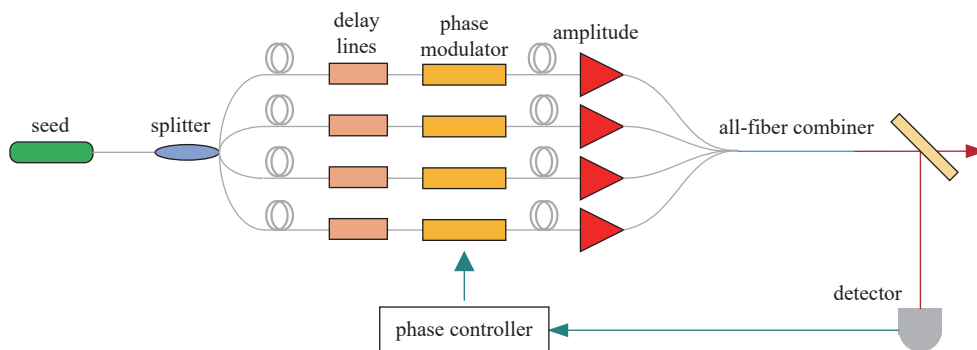


Fig. 1 Schematic diagram of the all-fiber coherent beam combination system

图 1 全纤化相干合成系统示意图

全光纤相干合成光源包含可相干合成窄线宽光纤光源、全纤化光纤合束器件、主动控制系统等三大关键组成部分,其中可相干合成窄线宽光纤光源、主动控制系统与自由空间结构相干合成光源基本相同,已有大量文献进行介绍^[28,32,64-65],本文主要从全纤化光纤合束器件方面来回顾全光纤相干合成技术的研究进展。根据全光纤合束器件的不同,将全光纤相干合成分为基于光纤耦合器的全光纤相干合成、基于“光子灯笼”的全光纤相干合成、基于相干信号合束器的全光纤相干合成以及基于方形光波导的全光纤相干合成,下面分别进行介绍。

1.1 基于光纤耦合器的全纤化相干合束方案

光纤耦合器是光学系统中常用的无源器件^[66-67],根据光路可逆原理,光纤耦合器可用于激光的分束与合束,工

作原理是利用激光之间的耦合作用使得多路激光输入后耦合到一根光纤中输出。利用光纤耦合器的合束方案根据锁相方式的不同,分为被动锁相合束方案与主动锁相的合束方案^[68]。由于被动锁相方案在多路数高功率的相干合成中不具备优势与潜力,难以实现多路数、大阵列、高功率的相干合成情况^[60-61],这里主要介绍主动锁相的相干合成方案。

基于光纤耦合器的主动锁相的相干合成方案,能够有效解决路数增大带来的效率下降的问题。2015年,杨燕等人利用3 dB光纤耦合器,实现了利用光纤耦合器的主动锁相合成方案^[69]。方案使用了2×2光纤耦合器作为基本耦合器单元,并用级联2×2耦合器的方法实现多端口耦合器,光纤耦合器的分光比例为50:50,输入信号在输出端能够实现平均分配。基于光纤耦合器的两路相干合成示意图如图2(a)所示,基于光纤耦合器的级联相干合成结构示意图如图2(b)所示,实验利用2×1相干合成模块(CCM)实现级联相干合成。

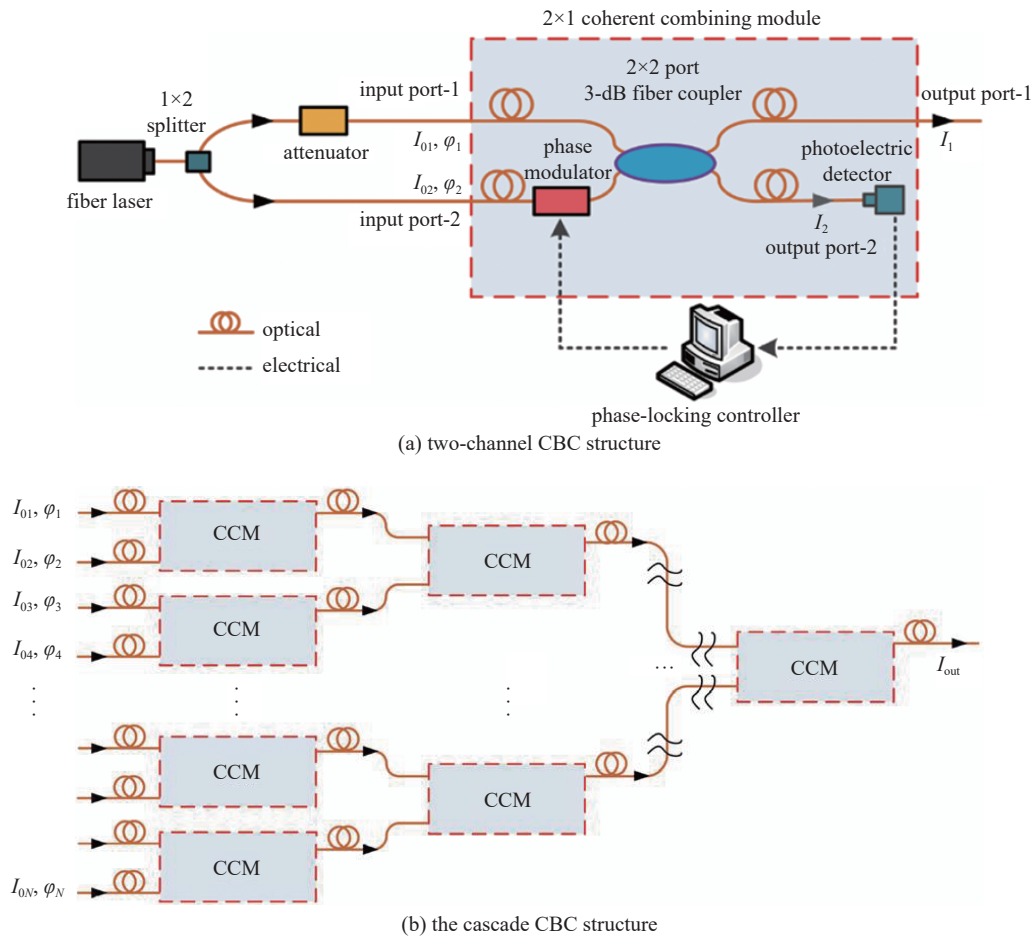


Fig. 2 Diagram of CBC based on optical fiber coupler

图2 基于光纤耦合器的相干合成示意图

2017年,杨燕等又开展了利用光纤偏振合束器的全光纤相干合成的研究^[70]。光纤偏振合束器的基本结构与光纤耦合器相似,区别在于输出端口的光纤慢轴方向沿其中一个输入端口的慢轴方向顺时针旋转了45°,可以将两束偏振态互相垂直的线偏振光耦合入一根光纤中。利用主动锁相技术将两束合成的线偏振光的相位差锁定为 $N\pi$ (N 为整数),就可以使合成后的光束仍然为线偏振光,再通过半波片等偏振态旋转器件调节合成后的线偏振光的偏振方向,然后通过级联光纤偏振合束器的方法,与另一束偏振方向垂直的线偏振光进行合成,可以实现多路相干偏振合成。相干偏振合成方法的理论合成效率可达100%。

图3是利用光纤偏振合束器开展的两路相干合成实验结构示意图,实验验证了全光纤偏振相干合成的可行性,实现了99.29%的合成效率。2018年,杨燕等人还开展了基于级联光纤偏振合束器的四路全光纤相干合成实验,实现了98.81%的合束效率^[71]。

由于光纤耦合器的承受功率有限,最后一级的光纤耦合器需要承受所有合成功率,使得基于光纤耦合器的全光纤合成方案在功率提升方面受到限制。因此,基于光纤耦合器的全光纤合成方案主要用于在低功率下开展新的

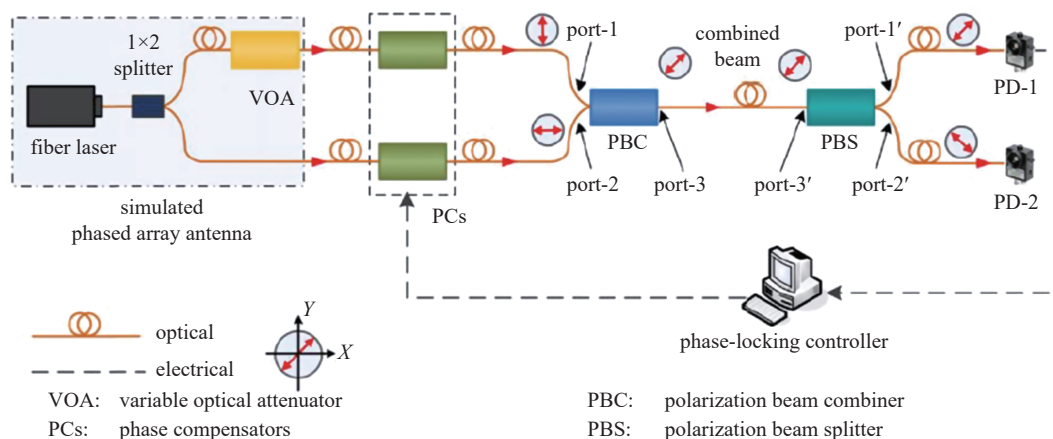


Fig. 3 Schematic diagram of two-channel CBC based on fiber polarization beam combiner

图 3 基于光纤偏振合束器的两路相干合成实验结构示意图

控制算法、控制体系的验证^[72], 如 2015 年韩国的 Hee Kyung Ahn 等研究人员利用光纤耦合器验证了 4×4 级联方案^[73], 2022 年澳大利亚的 Freier 等人利用光纤耦合器实现了基于单探测器电频抖动(LOCSET)的全数字传感和控制方案的两级级联方案的相干合成验证^[74]。

1.2 基于“光子灯笼”的全纤化相干合束方案

1.2.1 光子灯笼合束原理

光子灯笼是为了解决天文观测中的实际应用问题而开发的器件, 是一种连接单个多模波导与多个单模波导的低损耗器件, 一般采用低折玻璃管约束多根单模光纤熔融拉锥制作。光子灯笼的一端是一根满足特定模式条件的多模光纤(MMF), 另一端则是数根单模光纤(SMF), 如图 4 所示^[75], 结构与灯笼相近, 故称之为光子灯笼。

光子灯笼能够在多模光纤和多个分离的单模光纤之间实现低损耗传输, 因此, 根据光路可逆原理, 光子灯笼也可以实现将多个单模光束合成单个光束的功能, 如图 5 所示^[76]。因此, 光子灯笼有望实现全纤化的相干合成, 而且光子灯笼还可以实现合成激光的柔性传输, 具有在大功率激光中的应用潜力。

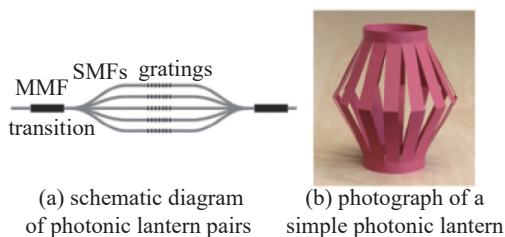


Fig. 4 Diagram of the structure of photonic lantern and traditional lantern

图 4 光子灯笼结构及传统灯笼结构示意图

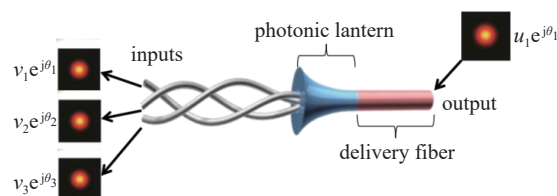


Fig. 5 Coherent beam combination principle of photonic lantern

图 5 光子灯笼相干合束原理图

1.2.2 研究进展

2016 年, 美国麻省理工学院的研究人员将三个单模光纤与一个多模光纤熔接制备了插损 3 dB 的光子灯笼, 然后实现了全纤化相干合成激光输出, 合成效率达到了 97%^[77], 实验结构如图 6 所示。

2017 年, 该团队制备了输出光纤为 25/400 μm 大模场面积光纤的光子灯笼, 光子灯笼插损为 0.8 dB。利用相位控制、偏振控制、幅度控制对注入光子灯笼的激光进行主动控制, 调控注入大模场面积增益光纤信号光模式, 在增益光纤中实现了千瓦级的单模激光输出^[78-79], 实验系统示意图及结果如图 7 所示。麻省理工的研究人员还开展了光子灯笼路数拓展的研究, 主要应用在提供将空间光经过光子灯笼传输到光阑上, 验证实现光谱滤波的可行性。

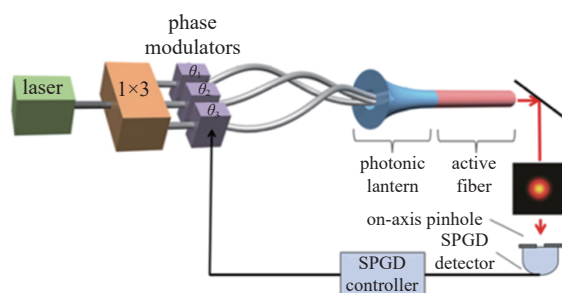


Fig. 6 Schematic diagram of 3×1 photonic lantern coherent combining

图 6 3×1 光子灯笼相干合成实验结构示意图

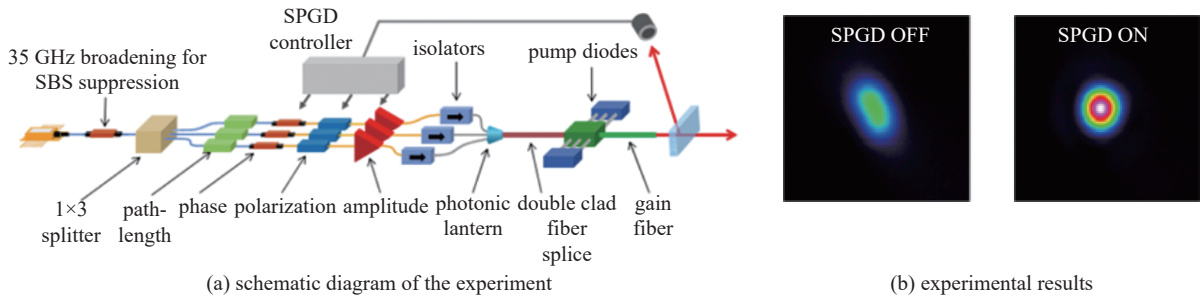


Fig. 7 Diagram of the structure and the results of kW photonic lantern system

图 7 千瓦级光子灯笼实验结构示意图及结果

2010年, 丹麦工业大学的 D.Noordegraaf 等人利用 61 个纤芯为 $8.2\ \mu\text{m}$ 的单模光纤进行组束, 光纤束拉锥后与纤芯为 $100\ \mu\text{m}$ 的多模光纤熔接, 制备了 61 路的光子灯笼, 插损 $0.76\ \text{dB}$, 结构如图 8 所示^[80]。2012 年, 该研究团队还实现了将 1 路纤芯为 $50\ \mu\text{m}$ 的多模光纤中的激光转换为 19 路 $8.2\ \mu\text{m}$ 纤芯的单模光纤中的单模激光^[81]。

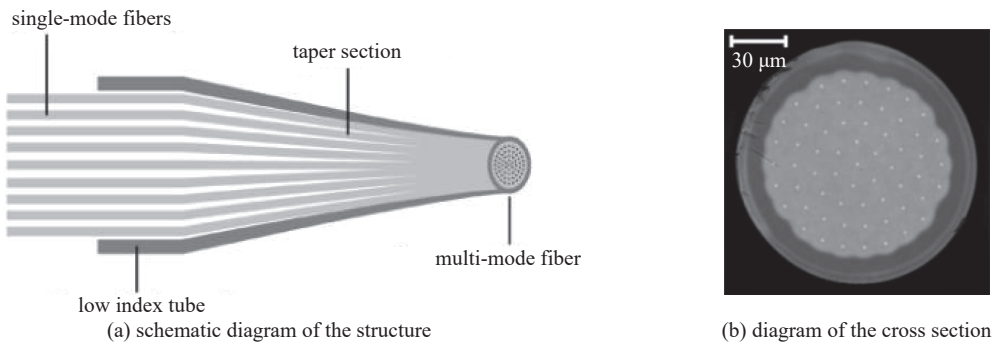


Fig. 8 Structure and section diagram of 61-core photonic lantern

图 8 61 路光子灯笼结构和截面示意图

近年来, 国内研究人员也开始开展了光子灯笼用于相干模式控制的研究。2021 年, 国防科学技术大学的陆瑶等人使用经氢氟酸腐蚀的芯径 $10\ \mu\text{m}$ 的单模光纤作为输入光纤, 制备了输出光纤为 $25\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ 的 3×1 光子灯笼和输出光纤为 $30\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ 的 5×1 光子灯笼^[82], 并利用 5×1 光子灯笼实现了光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 的准基模输出, 基模占比 $> 85\%$ 。2022 年, 陆瑶等人采用多段拼接式输出尾纤结构, 先将熔融拉锥后的 3 根单模光纤与 $30\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ 的多模光纤熔接, 再与 $50\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ 的多模光纤熔接, 最后与 $50\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 的多模光纤熔接, 制备了输出光纤为 $50\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 的 3×1 光子灯笼, 基模占比 $> 95\%$ ^[83], 光束质量 $M^2 \sim 1.4$, 3×1 光子灯笼的模式控制系统结构示意图及光子灯笼结构示意图和实验结果如图 9 所示。

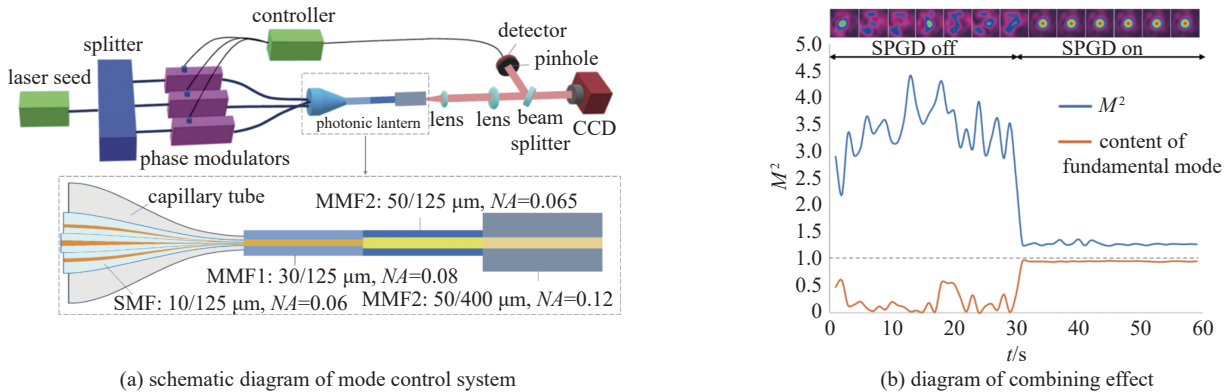


Fig. 9 Experimental structure diagram and results of 3×1 photonic lantern

图 9 3×1 光子灯笼实验结构示意图及结果

光子灯笼作为一种特殊的全光纤单模-多模转换器件, 能够利用主动控制实现多光束的相干合成, 而且随着光子灯笼器件制备工艺的不断发展, 研究人员已在低功率下实现了光子灯笼全纤化相干合成的原理演示与验证。但为了获得优异的模式控制效果, 光子灯笼的输入光纤模式需要为基模, 现有光子灯笼的输入光纤为单模光纤, 而且耦合损耗通常较高, 难以实现高功率的激光输出。因此, 光子灯笼在高功率相干合成中的应用还需要突破大模场

面积、低损耗高功率光纤器件制备工艺。此外,光子灯笼相干合成不仅需要控制相位、偏振,还需要增加对激光的幅度进行控制^[78-79],控制系统更加复杂。

1.3 基于信号合束器的全纤化相干合束方案

基于信号合束器的全光纤合束飞速发展,合成功率已达到 100 kW 量级^[84],但信号合束器的合束激光为多模光束,光束质量较差。为了提高合成激光的亮度和光束质量,研究人员在光纤信号合束器的基础上展开了相干合成的研究。

1.3.1 拉锥相干信号合束器全纤化相干合成

2012 年,美国的 Rothenberg 等人提出了相干信号合束器^[85],将 7 根尾纤进行紧密排列,经过熔融拉锥后形成锥形光纤束,锥形光纤束的尾端熔接端帽以输出激光,相干信号合束器的结构如图 10 所示^[86]。相干信号合束器利用大拉锥比技术实现光纤模场叠加与耦合,实现相干合成。

2012 年,以色列索雷克(Soreq)研究中心和 Civan 先进技术公司的研究人员对相干信号合束器展开了研究^[87]。研究人员制备了两路 Y 形结构的相干信号合束器,然后将种子源分为两路并放大,第一路与相干信号合束器一臂直接熔接,第二路利用偏振控制匹配第一路的偏振状态后与相干信号合束器另一臂熔接,合成光路与合成前后的光斑如图 11 所示,相干信号合束器合成光束光束质量 $M^2 \sim 1.17$,但 Y 形结构的相干信号合束器的技术细节未知。

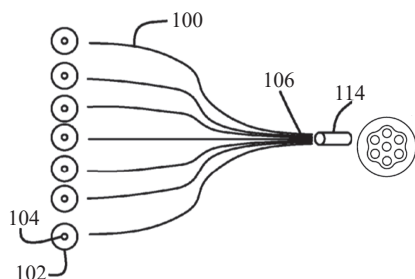


Fig. 10 Schematic diagram of the structure of the coherent signal beam combiner based on taper technology

图 10 基于拉锥技术的相干信号合束器结构示意图

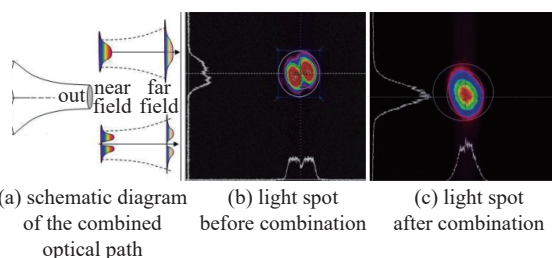
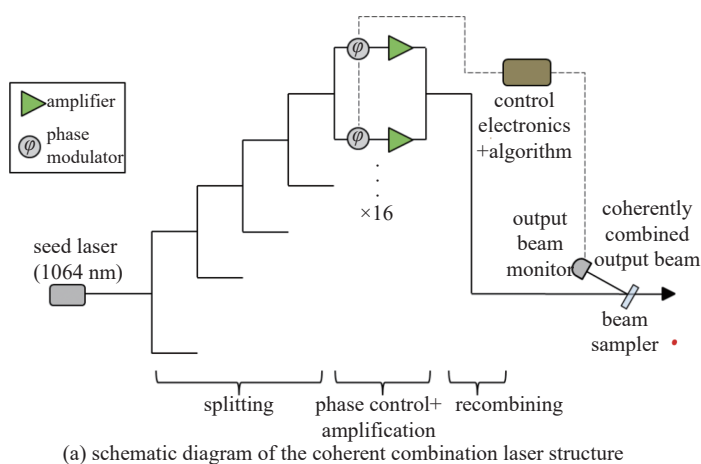


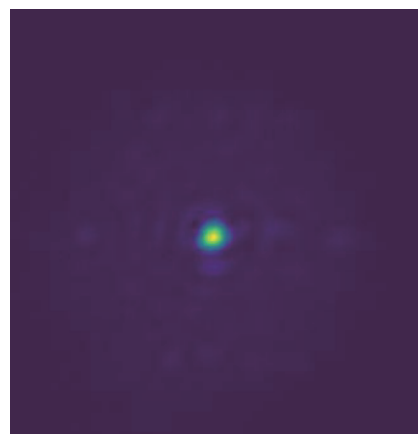
Fig. 11 Diagram of the experiment of coherent signal beam combiner and light spots before and after experiment

图 11 相干信号合束器实验原理示意图及实验前后光斑图

2020 年, Civan 先进技术公司的研究人员利用光纤束将 32 路 500 W 的光纤激光器进行相干合成,实现了 16 kW 的合成激光输出^[88],实验结构示意图和光束合成结果如图 12 所示。但由于商业保密原因, Civan 先进技术公司并未透露相关技术细节。



(a) schematic diagram of the coherent combination laser structure



(b) laser output spot

Fig. 12 Diagram of the 16 kW coherent beam combination system and the results

图 12 16 kW 相干合成激光实验系统及结果示意图

国内也较早开展了基于拉锥相干信号合束器的全纤化相干合成研究。2013 年,国防科技大学的李杰等人报道了两路 Y 形信号合束器的相干合成的研究^[89],实验结构如图 13 所示。实验中将 Y 形信号合束器与一段多模光纤熔接,再经准直输出(CO)。Y 形信号合束器直接的合成效果较差,为了获得了更优的相干激光的输出,实验中采用了主动相位控制和光束净化技术,实现了 69.5% 的桶中功率。

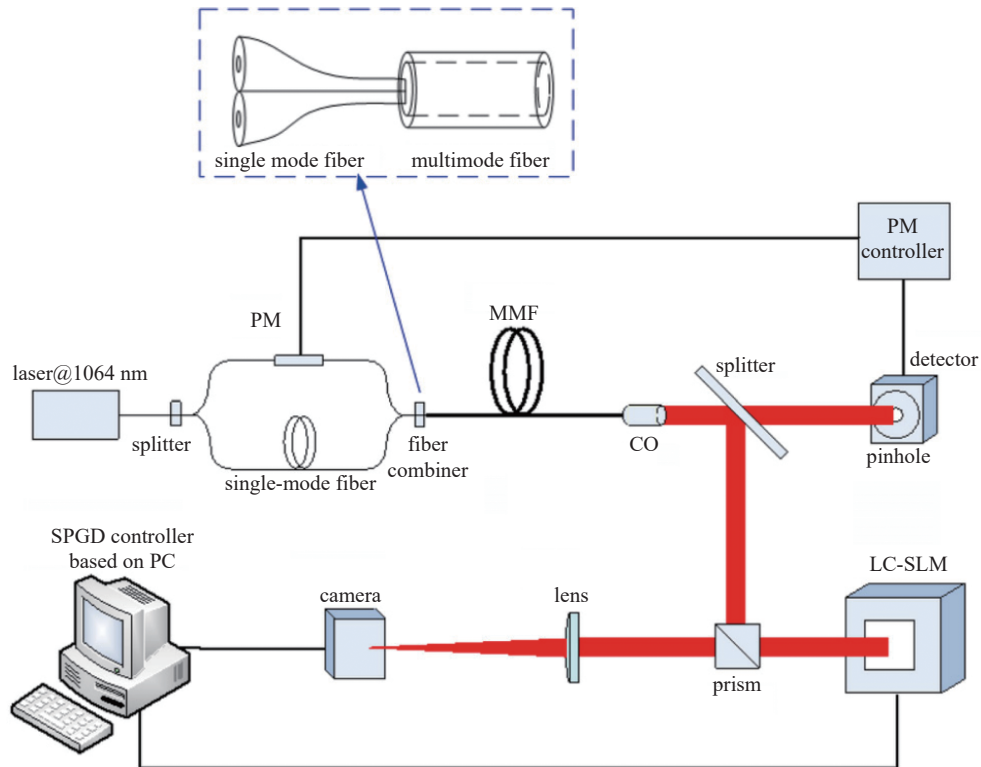


Fig. 13 Schematic diagram of the experimental structure of the two-channel Y-shaped coherent beam combination

图 13 两路 Y 形相干合束实验结构示意图

国防科学技术大学的研究人员持续开展了拉锥相干信号合束器验证, 2014 年先后实现了四路百 mW 级和 10 W 级拉锥相干信号合束器相干合成, 如图 14 所示^[90]。种子激光经过放大后分为四路, 四路放大后的激光经光纤功率合束器合成后经准直后输出。输出激光先经过透镜聚焦, 再经分光镜分束, 分别使用红外光斑分析仪和带小孔的光电探测器放置在焦点出采集数据, 实现相干合成^[91], 当各路输入激光的相位锁定时, 输出光束的光束质量得到明显改善, 合成输出激光的能量集中度获得较大提升、较开环状态提升 2.2 倍, 证明了光纤信号合束器用于实现高光束质量相干合成的可行性。

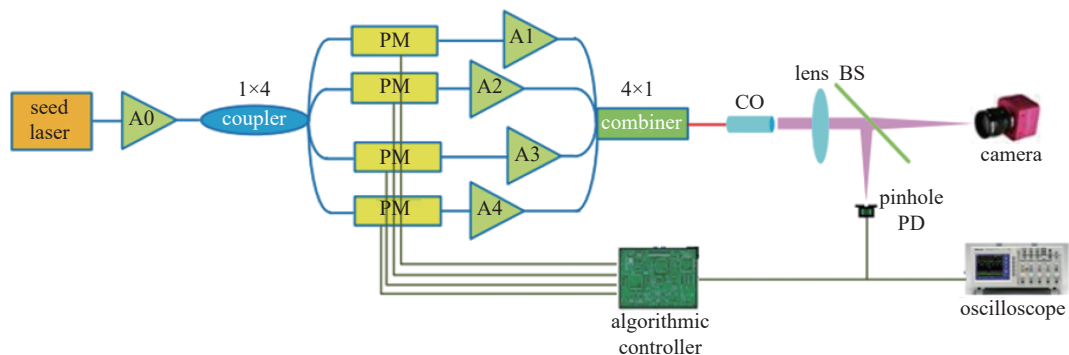


Fig. 14 Schematic diagram of the beam combining structure of the 4-way beam combiner

图 14 4 路合束器合束结构示意图

拉锥相干信号合束器本质上是分孔径相干合成, 通过光纤器件特有的拉锥工艺实现光场交叠、超高的占空比, 获得了“准”共孔径合成的效果。然而光场交叠需要大的拉锥比、低的模式扰动, 对光纤器件的拉锥工艺提出了极高的要求, 而且拉锥相干信号合束器还需要增加额外的无芯光纤, 进一步增大工艺难度, 因此, 拉锥相干合束器在器件制作上还需要进一步的工艺提升。

1.3.2 方形波导相干合束器全纤化相干合成

众所周知, 在方形波导中存在自成像效应, 也被称为泰伯效应, 具体为: 输入方形波导的光场会在沿着光波导的传输方向, 以周期性的方式呈现输入光场的单像及多重像的现象。而当输入的阵列光束的相位和光波导的传输

长度尺寸满足特定的匹配条件时,可以在波导的输出平面实现单孔径近衍射极限光束^[92-94]。2010年,美国洛克希德公司提出了将方形光波导的自成像效应用于相干合成^[92],实验结构如图15所示,但采用方形空心毛细管作为自成像波导,合成系统为分立空间结构,而且存在石英-空气界面,导致合成系统稳定性、功率耐受能力受限。

随着工业加工、照明、航天、通信等领域对特殊方形光源的需求^[95-97],以及激光中光束匀化整形的应用,方形光纤制备工艺得到了快速发展。2003年,日本东北大学的 Matsuura 等研究人员利用矩形空芯光纤实现了匀化光束整形,得到了能量分布均匀的矩形光斑^[98]。2006年,南安普顿大学的 Haynes 等研究人员也对方形纤芯空气包层光纤展开了研究,实现了圆形到方形的光斑匀化整形^[95]。2010年,日本学者 Konishi 等人利用矩形纤芯光纤实现了高斯光束的匀化整形,并研究了不同尺寸的矩形纤芯光纤以及不同数值孔径的光纤对整形效果的影响,其光纤截面的示意图如图16所示^[99]。

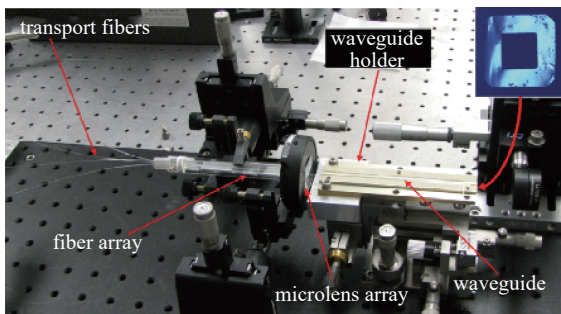


Fig. 15 Photograph of the free-space beam combiner module based on self-imaging effect

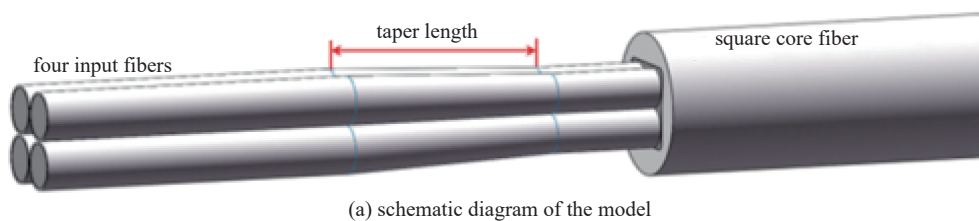
图 15 基于自成像效应的空间结构相干合成模块



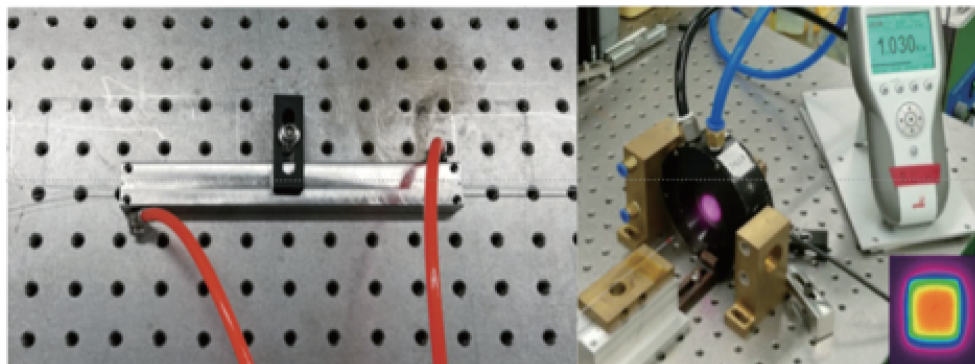
Fig. 16 Cross section of a rectangular core fiber

图 16 矩形纤芯光纤截面图

同时,近年来方阵排布光纤阵列技术也不断发展。2018年,韩国的 In Seok Choi 等人研究了 2×2 方形阵列的信号合束器^[100],由4个包层直径约为 $72.5 \mu\text{m}$ 的输入光纤逐渐变细制成的。通过蚀刻工艺蚀刻输入光纤的包层,减小了光纤阵列的纤芯直径和 NA 因拉锥比例太大导致的变化。由于锥形输入光纤的所有纤芯和包层都拼接到输出光纤的纤芯中,因此 4×1 合束器能够实现低损耗,并且还可以防止激光模式泄露。当大约 624.5 W 的光功率输入到该信号组合器时,观察到的最大输出约为 612 W ,效率为 98% , M^2 约为 14.6 。2021年,国防科技大学的研究人员也实现了 2×2 排布的4路光纤信号合束器^[101],实现了输出功率 12 kW ,输出光束质量 M^2 为 4.03 。随着方形光纤制备工艺、光纤阵列组束工艺的发展,2021年,半导体所的研究人员报道了 2×2 排布注入、方形光纤输出的高功率非相干信号合束器,并实现了 kW 级激光合成,但激光光束质量差,如图17所示^[102]。



(a) schematic diagram of the model



(b) combiner and combining results

Fig. 17 Diagram of structure and results of 2×2 incoherent signal combiner

图 17 2×2 非相干信号合束器结构示意图和实验结果

为了打破拉锥相干信号合束器面临的工艺困境,2021年,本课题组提出了基于方形波导光纤自成像原理的全光纤相干合成方案——光波导自成像合束方案:采用方形光纤作为自成像光波导,将激光器输出尾纤经过组束后与方形光纤熔接,利用方形光纤的自成像效应实现全光纤的相干合成,全光纤合束器如图18所示^[103]。基于自成像原理的全纤化相干合成器利用自成像原理实现共孔径的相干合成,不需要对光纤束进行大比例的拉锥,有望克服拉锥型全纤化相干合束器的不足。

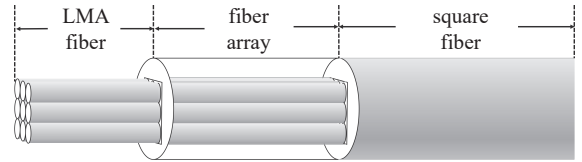


Fig. 18 Schematic diagram of square fiber combiner

图18 方形光纤合束器示意图

本课题组建立了基于 2×2 光纤阵列的方形光纤合束器模型,对方形光纤的自成像效应和合束效果进行了理论仿真。理论仿真结果表明,经过对合束器的结构参数的设计与优化,当输入光斑为单模 2×2 光纤阵列光斑时,最终合束光斑光束质量 M^2 为1.147,合束效率约为99.54%^[103]。此外,还对合束器的数值孔径(NA)、路数拓展进行了仿真,仿真结果如图19(a)、(b)所示。从结果可以看出,随着光纤阵列数的增加,合束效果变差,而随着方形光纤的数值孔径的增加,合束效果变好。因此,当光纤阵列数增加时,可以通过增加方形光纤的数值孔径来保持合束效果。

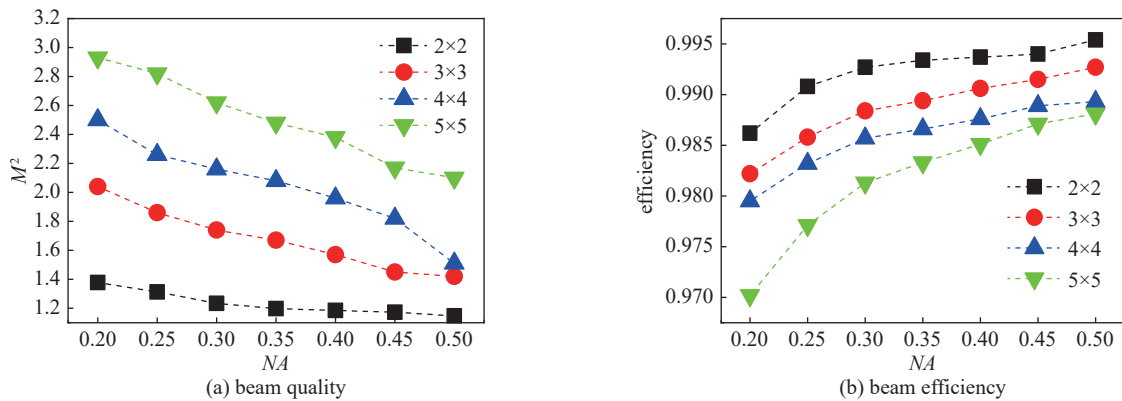


Fig. 19 Diagram of the function of the combining effects of NA with different fiber arrays

图19 不同光纤阵列下,合束效果随方形光纤数值孔径变化示意图

本课题组还对方形光纤的自成像效应开展了理论仿真和相应的实验验证,分别仿真了输入光斑、一个自成像周期长度的光斑、二分之一以及三分之一自成像周期长度的光斑,结果如图20所示。从实验结果可以看出,理论仿真与实验结果吻合,方形光纤具有良好的自成像效应,验证了方形光纤实现相干合成的可行性。

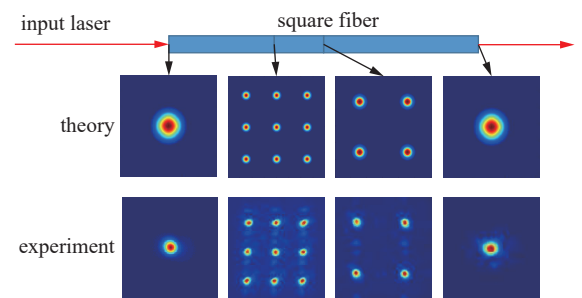


Fig. 20 Theoretical and experimental verification results of square fiber self-imaging effect

图20 方形光纤自成像效应理论和实验验证结果

根据理论设计,本课题组首次制备了基于自成像波导的相干信号合束器,该方案将纤芯 $20 \mu\text{m}$ 的大模场面积光纤在玻璃管中排布为 2×2 阵列,再与方形光纤熔接,结构示意图如图21(a)所示^[104]。方形阵列输出光斑及合成光斑如图21(b)、(c)所示,输入光斑为4个呈方形排布的光纤阵列光斑,经方形光纤的自成像效应后合成为一个光斑,中央主瓣能量占比约52.7%,首次从实验上验证了基于自成像波导的相干信号合束器的可行性。

基于信号合束器的全光纤合束具有功率负载高、通道拓展能力强等特点,是高功率全纤化相干合成的潜在技术途径之一,但基于拉锥合束的全纤化相干合束器本质上是分孔径相干合成,而且需要在信号光纤外围增加无芯光纤,导致拉锥光纤束数目增加、器件制备难度大。基于自成像波导全纤化相干合束器有望实现高于99%的合束效果和近衍射极限的合成光斑,成为全纤化相干合成的潜在方案。实际制备的方形光纤的截面并非完美的正方形,而是存在圆角、斜边等偏差,如图22所示^[103],对合束效果带来较大的影响,是导致主瓣能量占比低于理论值的主要原因。因此,需要在方形自成像波导制备方面开展攻关,不断提升方形波导形貌精度。

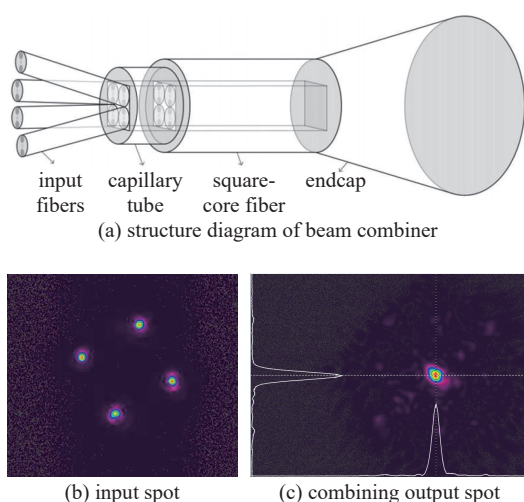


Fig. 21 Diagram of the beam combiner based on the square fiber, the input spots and combining result

图 21 基于方形光纤的光纤合束器结构示意图、输入光斑和合成结果

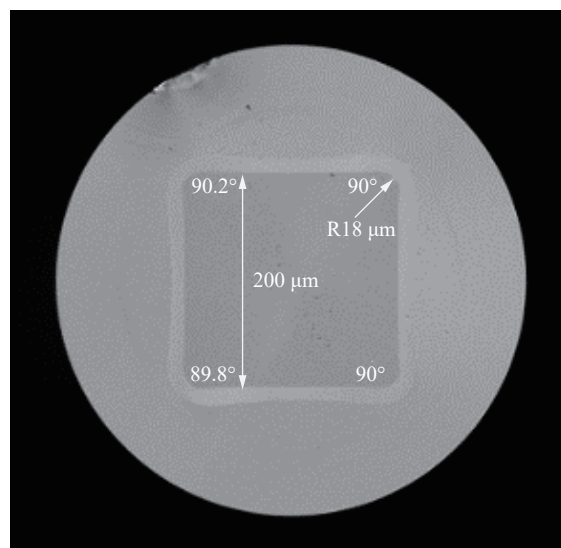


Fig. 22 Cross section of a square core fiber

图 22 方形光纤截面图

2 结论与展望

基于光纤合束器件的相干合成方案不仅能够克服空间结构相干合成方案结构复杂、稳定性不足的问题,还可以解决非相干合束器亮度低的不足,实现近衍射极限的高光束质量合成光束,在高功率光纤激光相干合成的发展中具有巨大的发展潜力,有望满足激光清扫太空碎片、激光等离子金属表面冲击强化等高功率高光束质量激光的应用需求。本文回顾了近年来基于全光纤合束器件激光相干合成的合成方案和研究进展,对目前全光纤激光相干合成的主要方案进行了回顾与总结,通过梳理发现:基于光纤合束器件的全光纤相干合成方案具有结构紧凑、无需光路调节、性能稳定、全部激光功率单端口输出等优势,在光纤激光相干合成中具有巨大应用前景;基于光纤耦合器的全纤化相干合成方案输出功率受限,难以大幅提升,目前主要用于在低功率进行新控制算法、新控制体系、新控制硬件等的验证,支撑相干合成技术不断推陈出新;基于光子灯笼的全纤化相干合成具有 100% 的理论合成效率,并已在低功率下实现了相干合成验证,合成效率高达 97%,但插损较大,主要用于低功率光纤激光模式控制,在功率提升方面还需进一步的研究,突破大模场面积、低损耗的光子灯笼器件制备工艺;拉锥全纤化信号相干合束器可以继承现有信号合束器的工艺与技术,具有高功率输出的负载能力,但本质上是分孔径相干合成,需要光场交叠与耦合才能实现“准”共孔径的相干合成效果,光纤束的拉锥比通常较大,还需要增加额外的无芯光纤,制作工艺难度较大、路数拓展困难,而基于自成像原理的全光纤相干合束方案具备实现大于 99% 的理论合束效率和接近近衍射极限的光束质量的潜力,既具有信号合束器高负载的优势,又具有共孔径合成无旁瓣的特点,有望成为全纤化相干合成技术的重要发展方向,目前已完成低功率原理验证,但由于方形光纤形貌精度偏差大,合成效率较低。

综上所述,全纤化相干合成方案实现高功率、高效率相干合成、走向超高功率应用仍需要突破光纤器件面临的材料及工艺难题,亟需对基于光子灯笼的全纤化相干合成和基于方形光纤的全纤化相干合成方案进行深入探索,对光纤合束器所需的光纤波导材料及制作工艺进行优化,以实现高效率高光束质量的全纤化相干合成输出。

参考文献:

- [1] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20: 0904123.
- [2] Naeem M. Advances in drilling with fiber lasers[C]//*Proceedings of SPIE 9657, Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015)*. 2015: 965705.
- [3] Clery D. Laser fusion, with a difference[J]. *Science*, 2015, 347(6218): 111-112.
- [4] Shi Wei, Schulzgen A, Amezcuca R, et al. Fiber lasers and their applications: introduction[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): FLA1.
- [5] 杨昌盛, 徐善辉, 周军, 等. 大功率光纤激光材料与器件关键技术研究进展[J]. *中国科学:技术科学*, 2017, 47(10): 1038-1048. (Yang Changsheng, Xu Shanhui, Zhou Jun, et al. Research advance on the key technology of high-power fiber laser materials and components[J]. *CIENTIA SINICA Technologica*, 2017, 47(10): 1038-1048)
- [6] 周朴, 黄良金, 冷进勇, 等. 高功率双包层光纤激光器: 30 年的发展历程[J]. *中国科学:技术科学*, 2020, 50(2): 123-135. (Zhou Pu, Huang Liangjin, Leng Jinyong, et al. High-power double-cladding fiber lasers: a 30-year overview[J]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2020, 50(2): 123-135)

- [7] 党文佳, 李哲, 李玉婷, 等. 高功率连续波掺镱光纤激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 676-694. (Dang Wenjia, Li Zhe, Li Yuting, et al. Recent advances in high-power continuous-wave ytterbium-doped fiber lasers[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 676-694)
- [8] 肖起榕, 田佳丁, 李丹, 等. 级联泵浦高功率掺镱光纤激光器: 进展与展望[J]. *中国激光*, 2021, 48: 1501004. (Xiao Qirong, Tian Jiading, Li Dan, et al. Tandem-pumped high-power ytterbium-doped fiber lasers: progress and opportunities[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 1501004)
- [9] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//Proceedings of the CLEO: Science and Innovations 2013. 2013: AF2J. 1.
- [10] Lin Honghuan, Xu Lixin, Li Chengyu, et al. 10.6 kW high-brightness cascade-end-pumped monolithic fiber lasers directly pumped by laser diodes in step-index large mode area double cladding fiber[J]. *Results in Physics*, 2019, 14: 102479.
- [11] Liu Zejin, Jin Xiaoxi, Su Rongtao, et al. Development status of high power fiber lasers and their coherent beam combination[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62: 41301.
- [12] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率国产化10 kW光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39: 0336001. (Chen Xiaolong, Lou Fengguang, He Yu, et al. Home-made 10kW fiber laser with high efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39: 0336001)
- [13] 林傲祥, 肖起榕, 倪力, 等. 国产YDF有源光纤实现单纤20 kW激光输出[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0916003. (Lin Aoxiang, Xiao Qirong, Ni Li, et al. Home-made YDF active fiber realizes single fiber 20 kW laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0916003)
- [14] 肖虎, 潘志勇, 陈子伦, 等. 基于自研光纤和器件实现20kW高光束质量激光稳定输出[J]. *中国激光*, 2022, 49: 1616002. (Xiao Hu, Pan Zhiyong, Chen Zilun, et al. Based on self-developed optical fibers and devices to achieve stable output of 20kW high beam quality laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49: 1616002)
- [15] 王鹏, 奚小明, 张汉伟, 等. LD泵浦光纤激光放大器实现13 kW高光束质量输出[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 35: 121001. (Wang Peng, Xi Xiaoming, Zhang Hanwei, et al. Laser-diode-pumped fiber laser amplifier for 13 kW high-beam-quality output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 35: 121001)
- [16] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [17] Zhu Jiajian, Zhou Pu, Ma Yanxing, et al. Power scaling analysis of tandem-pumped Yb-doped fiber lasers and amplifiers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18645-18654.
- [18] Tao Rumao, Wang Xiaolin, Zhou Pu. Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24: 0903319.
- [19] Zervas M N. Transverse mode instability, thermal lensing and power scaling in Yb³⁺-doped high-power fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 19019-19041.
- [20] 王建军, 刘珂, 李敏, 等. 光纤激光模式不稳定研究十年回顾与展望[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 121003. (Wang Jianjun, Liu Yu, Li Min, et al. Ten-year review and prospect on mode instability research of fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 121003)
- [21] 林傲祥, 彭昆, 俞娟, 等. 高功率连续波光纤激光系统热效应及其抑制措施[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 011005. (Lin Aoxiang, Peng Kun, Yu Juan, et al. Thermal effect and its suppression in high-power continuous-wave fiber laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 011005)
- [22] 张春, 谢亮华, 楚秋慧, 等. 高功率光纤激光受激拉曼散射效应研究新进展[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 021002. (Zhang Chun, Xie Lianghua, Chu Qihui, et al. Research progress of stimulated Raman scattering effect in high power fiber lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 021002)
- [23] Jauregui C, Limpert J, Tünnermann A. High-power fibre lasers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 861-867.
- [24] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势[J]. *中国激光*, 2021, 48: 2000001. (Zhou Pu, Leng Jinyong, Xiao Hu, et al. High average power fiber lasers: research progress and future prospect[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 2000001)
- [25] 楼祺洪, 何兵, 周军. 光纤激光器及其相干组束[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2): 155-159. (Lou Qihong, He Bing, Zhou Jun. Fiber lasers and it's coherent beam combination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 155-159)
- [26] Flores A, Dajani I, Holten R, et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55: 096101.
- [27] Liu Zejin, Ma Pengfei, Su Rongtao, et al. High-power coherent beam polarization combination of fiber lasers: progress and prospect [Invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A7-A14.
- [28] 王小林, 周朴, 栗荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0201001. (Wang Xiaolin, Zhou Pu, Su Rongtao, et al. Current situation, tendency and challenge of coherent combining of high power fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0201001)
- [29] Klenke A, Müller M, Stark H, et al. Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24: 0902709.
- [30] Ma Pengfei, Chang Hongxiang, Ma Yanxing, et al. 7.1 kW coherent beam combining system based on a seven-channel fiber amplifier array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107016.
- [31] 吴坚, 马阎星, 马鹏飞, 等. 光纤激光相干合成20 kW级高功率输出[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50: 20210621. (Wu Jian, Ma Yanxing, Ma Pengfei, et al. Fiber laser coherent beam combination of 20 kW class high power output[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50: 20210621)
- [32] 周朴, 栗荣涛, 马阎星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. *中国激光*, 2021, 48: 0401003. (Zhou Pu, Su Rongtao, Ma Yanxing, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0401003)
- [33] Ma Yanxing, Wang Xiaolin, Leng Jinyong, et al. Coherent beam combination of 1.08 kW fiber amplifier array using single frequency dithering technique[J].

- [Optics Letters](#), 2011, 36(6): 951-953.
- [34] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. [Optics Letters](#), 2020, 45(11): 3083-3086.
- [35] Goodno G D, Weiss S B. Automated co-alignment of coherent fiber laser arrays via active phase-locking[J]. [Optics Express](#), 2012, 20(14): 14945-14953.
- [36] Zhi Dong, Ma Pengfei, Ma Yanxing, et al. Novel adaptive fiber-optics collimator for coherent beam combination[J]. [Optics Express](#), 2014, 22(25): 31520-31528.
- [37] Mueller M, Klenke A, Steinkopff A, et al. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser[C]//Proceedings of SPIE 10897, Fiber Lasers XVI: Technology and Systems. 2019: 1089719.
- [38] Ma Yanxing, Luo Gen, He Shuyue, et al. Cantilevered adaptive fiber-optics collimator based on piezoelectric bimorph actuators[J]. [Applied Optics](#), 2022, 61(11): 3195-3200.
- [39] 陈子伦, 周旋风, 王泽锋, 等. 高功率光纤激光器功率合束器的研究进展(特邀)[J]. [红外与激光工程](#), 2018, 47: 0103005. (Chen Zilun, Zhou Xuanfeng, Wang Zefeng, et al. Review of all-fiber signal combiner for high power fiber lasers [Invited][J]. [Infrared and Laser Engineering](#), 2018, 47: 0103005)
- [40] Rockwell D A, Shkunov V V, Marcianti J R. Semi-guiding high-aspect-ratio core (SHARC) fiber providing single-mode operation and an ultra-large core area in a compact coilable package[J]. [Optics Express](#), 2011, 19(15): 14746-14762.
- [41] Sun Jiapo, Liu Lie, Han Lianghua, et al. 100 kW ultra high power fiber laser[J]. [Optics Continuum](#), 2022, 1(9): 1932-1938.
- [42] Shcherbakov E A, Fomin V V, Abramov A A, et al. Industrial grade 100 kW power CW fiber laser[C]//Proceedings of the Advanced Solid State Lasers. 2013: ATh4A. 2.
- [43] Kozlov V A, Hernández-Cordero J, Morse T F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers[J]. [Optics Letters](#), 1999, 24(24): 1814-1816.
- [44] Wang Baishi, Mies E, Minden M, et al. All-fiber 50 W coherently combined passive laser array[J]. [Optics Letters](#), 2009, 34(7): 863-865.
- [45] Fotiadi A A, Antipov O L, Mégret P. Resonantly induced refractive index changes in Yb-doped fibers: the origin, properties and application for all-fiber coherent beam combining[M]//Pal B. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*. Vukovar: InTech, 2010: 209-234.
- [46] Wang Baishi, Sanchez A. All-fiber passive coherent beam combining of fiber lasers and challenges[C]//Proceedings of the Fiber Laser Applications 2012. 2012: FTh3A. 2.
- [47] 杨保来, 王小林, 周朴, 等. 全光纤结构的光纤环被动锁相相干合成研究[J]. [中国激光](#), 2014, 41: 1005001. (Yang Baolai, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Research of all-fiber laser coherent combining system based on fiber-loop[J]. [Chinese Journal of Lasers](#), 2014, 41: 1005001)
- [48] Kambayashi Y, Yoshida M, Sasaki T, et al. All-fiber phase-control-free coherent-beam combining toward femtosecond-pulse amplification[J]. [Optics Communications](#), 2017, 382: 556-558.
- [49] Takahashi Y, Yamazaki T, Yoshida M. Development of all-fiber coherent beam combining optical system toward higher output of the fiber laser[J]. [Journal of Laser Applications](#), 2020, 32: 022077.
- [50] Lhermite J, Desfarges-Berthelemot A, Kermene V, et al. Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop[J]. [Optics Letters](#), 2007, 32(13): 1842-1844.
- [51] Shakir S A, Culver B, Nelson B, et al. Power scaling of passively phased fiber amplifier arrays[C]//Proceedings of SPIE 7070, Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing IV. 2008: 70700N.
- [52] Li Zhen, Zhou Jun, He Bing, et al. Impact of phase perturbation on passive phase-locking coherent beam combination[J]. [IEEE Photonics Technology Letters](#), 2012, 24(8): 655-657.
- [53] Xue Yuhao, He Bing, Zhou Jun, et al. Array size scaling of passive coherent beam combination in fiber laser array[J]. [Chinese Optics Letters](#), 2012, 10: 011401.
- [54] Sabourdy D, Kermène V, Desfarges-Berthelemot A, et al. Power scaling of fibre lasers with all-fibre interferometric cavity[J]. [Electronics Letters](#), 2002, 38(14): 692-693.
- [55] Shirakawa A, Saitou T, Sekiguchi T, et al. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler[J]. [Optics Express](#), 2002, 10(21): 1167-1172.
- [56] Sabourdy D, Kermène V, Desfarges-Berthelemot A, et al. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers[J]. [Optics Express](#), 2003, 11(2): 87-97.
- [57] Wang Baishi, Sanchez A D. All-fiber passive coherent combining of high power lasers[J]. [Optical Engineering](#), 2011, 50: 111606.
- [58] Wu T W, Chang W Z, Galvanauskas A, et al. Model for passive coherent beam combining in fiber laser arrays[J]. [Optics Express](#), 2009, 17(22): 19509-19518.
- [59] Kouznetsov D, Bisson J F, Shirakawa A, et al. Limits of coherent addition of lasers: simple estimate[C]//2005 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics. 2005: 1061-1063.
- [60] Glova A F, Lysikov A Y, Musena E I. Phase locking of 2D laser arrays by the spatial filter method[J]. [Quantum Electronics](#), 2002, 32(3): 277-278.
- [61] Glova A F. Phase locking of optically coupled lasers[J]. [Quantum Electronics](#), 2003, 33(4): 283-306.
- [62] Goodno G D, Mcnaught S J, Rothenberg J E, et al. Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier[J]. [Optics Letters](#), 2010, 35(10): 1542-1544.
- [63] Goodno G D, Mcnaught S J, Weber M E, et al. Multichannel polarization stabilization for coherently combined fiber laser arrays[J]. [Optics Letters](#), 2012, 37(20): 4272-4274.
- [64] 来文昌, 马鹏飞, 肖虎, 等. 高功率窄线宽光纤激光技术[J]. [强激光与粒子束](#), 2020, 32: 121001. (Lai Wenchang, Ma Pengfei, Xiao Hu, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 121001)

- [65] 楚秋慧, 郭超, 颜冬林, 等. 高功率窄线宽光纤激光器的研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 121004. (Chu Qiuhui, Guo Chao, Yan Donglin, et al. Recent progress of high power narrow linewidth fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 121004)
- [66] 廖延彪. 光纤光学: 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (Liao Yanbiao. Fiber optics: principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010)
- [67] 迟泽英. 光纤光学与光纤应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014. (Chi Zeying. Fiber optics, theories and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014)
- [68] Rothenberg J E, Goodno G D. Advances and limitations in beam combination of kilowatt fiber amplifiers[C]//Proceedings of SPIE 7686, Laser Technology for Defense and Security VI. 2010: 768613.
- [69] 杨燕, 耿超, 李枫, 等. 基于3-dB光纤耦合器的级联式光纤激光相干合成方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35: s106005. (Yang Yan, Geng Chao, Li Feng, et al. Research of cascaded coherent combining of fiber lasers based on 3-dB fiber couplers[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35: s106005)
- [70] Yang Yan, Geng Chao, Li Feng, et al. Combining module based on coherent polarization beam combining[J]. Applied Optics, 2017, 56(7): 2020-2028.
- [71] 杨燕. 基于光纤器件相干合成的多孔径接收技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2018. (Yang Yan. Research on multi-aperture receiver with fiber-based coherent beam combining[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018)
- [72] 耿超, 杨燕, 李枫, 等. 光纤激光相干合成研究进展[J]. 光电工程, 2018, 45: 170692. (Geng Chao, Yang Yan, Li Feng, et al. Research progress of fiber laser coherent combining[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45: 170692)
- [73] Ahn H K, Kong H J. Cascaded multi-dithering theory for coherent beam combining of multiplexed beam elements[J]. Optics Express, 2015, 23(9): 12407-12413.
- [74] Freier C, Legge S, Roberts L, et al. Scalable all-fiber coherent beam combination using digital control[J]. Applied Optics, 2022, 61(15): 4543-4548.
- [75] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, et al. The photonic lantern[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(2): 107-167.
- [76] Montoya J, Aleshire C, Hwang C, et al. Photonic lantern adaptive spatial mode control in LMA fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3405-3413.
- [77] Aleshire C, Montoya J, Hwang C, et al. Photonic lantern mode control in few-moded fiber amplifiers using SPGD[C]//Proceedings of the CLEO: Science and Innovations 2016. 2016: SM2Q. 6.
- [78] Montoya J, Hwang C, Martz D, et al. Photonic lantern kW-class fiber amplifier[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27543-27550.
- [79] Montoya J, Aleshire C, Hwang C, et al. Transverse-mode instability mitigation using photonic-lantern adaptive spatial mode control[C]//Proceedings of the CLEO: Science and Innovations. 2017: SM1L. 6.
- [80] Noordegraaf D, Skovgaard P M W, Maack M D, et al. Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port Photonic Lantern[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 4673-4678.
- [81] Noordegraaf D, Skovgaard P M W, Sandberg R H, et al. Nineteen-port photonic lantern with multimode delivery fiber[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 452-454.
- [82] Lu Yao, Liu Wenguang, Chen Zilun, et al. Spatial mode control based on photonic lanterns[J]. Optics Express, 2021, 29(25): 41788-41797.
- [83] Lu Yao, Chen Zilun, Liu Wenguang, et al. Stable single transverse mode excitation in 50 μm core fiber using a photonic-lantern-based adaptive control system[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22435-22441.
- [84] Wang Baishi, Mies E. Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers[C]//Proceedings of SPIE 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications. 2009: 71950A.
- [85] Rothenberg J E, Cheung E C T. Integrated spectral and all-fiber coherent beam combination: 8184361[P]. 2012-05-22.
- [86] Rothenberg J E. All-fiber integrated high power coherent beam combination: 8184363B2[P]. 2012-05-22.
- [87] Shamir Y, Zuitlin R, Sintov Y, et al. 3kW-level incoherent and coherent mode combining via all-fiber fused Y-couplers[C]//Proceedings of the Frontiers in Optics 2012. 2012: FW6C. 1.
- [88] Shekel E, Vidne Y, Urbach B. 16kW single mode CW laser with dynamic beam for material processing[C]//Proceedings of SPIE 11260, Fiber Lasers XVII: Technology and Systems. 2020: 1126021.
- [89] Li Jie, Zhao Haichuan, Chen Zilun, et al. All-fiber active coherent combining via a fiber combiner[J]. Optics Communications, 2013, 286: 273-276.
- [90] Yang Baolai, Wang Xiaolin, Ma Pengfei, et al. Active phase locking of four Yb-doped fiber amplifiers with a multi-mode fiber combiner[C]//Proceedings of the Fiber-Based Technologies and Applications 2014. 2014: JF2A. 6.
- [91] 杨保来. 全光纤结构光纤激光主被动相干合成技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014. (Yang Baolai. Study on active and passive coherent combining of fiber lasers in all-fiber configuration[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014)
- [92] Uberna R, Bratcher A, Alley T G, et al. Coherent combination of high power fiber amplifiers in a two-dimensional re-imaging waveguide[J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13547-13553.
- [93] Tao Rumao, Si Lei, Ma Yanxing, et al. Coherent beam combination of fiber lasers with a strongly confined waveguide: numerical model[J]. Applied Optics, 2012, 51(24): 5826-5833.
- [94] Tao Rumao, Wang Xiaolin, Xiao Hu, et al. Coherent beam combination of fiber lasers with a strongly confined tapered self-imaging waveguide: theoretical modeling and simulation[J]. Photonics Research, 2013, 1(4): 186-196.
- [95] Haynes J R, Baggett J C, Monro T M, et al. Square core jacketed air-clad fiber[C]//2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference. 2006.

- [96] Blomster O, Blomqvist M. Square formed fiber optics for high power applications[C]//Proceedings of the 4th International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. 2007.
- [97] Blomqvist M, Campbell S, Latokartano J, et al. Multi-kW laser cladding using cylindrical collimators and square-formed fibers[C]//Proceedings of SPIE 8239, High Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications. 2012: 82390L.
- [98] Matsuura Y, Akiyama D, Miyagi M. Beam homogenizer for hollow-fiber delivery system of excimer laser light[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(18): 3505-3508.
- [99] Konishi K, Kanie T, Takahashi K, et al. Development of rectangular core optical fiber cable for high power laser[J]. *SEI Technical Review*, 2010(71): 109-112.
- [100] Choi I S, Park J, Jeong H, et al. Fabrication of 4×1 signal combiner for high-power lasers using hydrofluoric acid[J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30667-30677.
- [101] Fu Min, Li Zhixian, Wang Zefeng, et al. Research on a 4×1 fiber signal combiner with high beam quality at a power level of 12kW[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26658-26668.
- [102] Zou Shuzhen, Yu Haijuan, Zuo Jiexi, et al. Kilowatt-level 4×1 fiber combiner of low brightness loss with a square core output fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(7): 2130-2135.
- [103] Yan Yuefang, Liu Yu, Zhang Haoyu, et al. Principle and numerical demonstration of high power all-fiber coherent beam combination based on self-imaging effect in a square core fiber[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(2): 444-455.
- [104] Liu Yu, Li Yue, Li Yuwei, et al. Fabrication of all-fiber 2×2 coherent beam combiner for high power CBC applications[C]//Proceedings of the Laser Applications Conference 2021. 2021: JTU1A. 19.